بررسی و تحلیل تأثیر پارامترهای شکل‌دهی در فرآیند هیدروفرمینگ ورق*

بهروز زارع [۱] محمد بخشی [۲] عبدالحمید گرجی [۳] سلمان نوروزی [٤]

چکیده *هدف این مقاله توسعه‌ی یک روش اصولی برای مطالعه و تحلیل تأثیر پارامترهای شکل‌دهی روی کیفیت شکل‌پذیری قطعات و تخمین ترکیب بهینه‌ی این پارامترها در فرآیند هیدروفرمینگ ورق می‌باشد. در این مقاله، تأثیر پارامترهای کلیدی شکل‌دهی هم‌چون فشار سیال محفظه‌ی شکل‌دهی، ضریب اصطکاک سطح تماس سنبه و ورق، فاصله‌ی بین سطح لبه محیطی قالب با سطح ورق‌گیر و شعاع ورودی قالب در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مورد بحث قرار گرفته است. ابتدا مدل اجزای محدود برای شبیه‌سازی فرآیند ایجاد گردید و نشان داده شد که مدل توسعه‌داده‌شده مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد. سپس، با استفاده از ترکیب روش اجزای محدود و تکنیک تاگوچی به‌همراه تحلیل واریانس تأثیر پارامترهای نام‌برده‌شده بر قطعات شکل‌داده‌شده از دو جنس مس خالص و فولاد St14 مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که برای هر دو حالت بیش‌ترین نازک‌شدگی در یک عمق کشش ثابت و بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی، فشار سیال بیش‌ترین تأثیر را بر شکل‌پذیری قطعه‌کار در فرآیند هیدروفرمینگ ورق دارد. هم‌چنین با استفاده از سنبه‌ی خشن‌تر، فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی محیطی قالب با سطح ورق‌گیر کم‌تر و شعاع ورودی بزرگ‌تر شرایط شکل‌دهی به‌تر خواهد شد.*

واژه‌های کلیدی کشش عمیق هیدرودینامیکی; روش اجزای محدود; تکنیک تاگوچی; تحلیل واریانس

Analysis of Forming Parameters in Sheet Hydro-Forming Process

B. Zareh M. Bakhshi A.H. Gorji S. Nourouzi

Abstract *The aim of this paper is to develop a systematic method to analyze the effects of forming parameters on the quality of part formability and determine the optimal combination of the forming parameters for the sheet hydroforming process. In this paper, the effects of four important process parameters namely fluid pressure, friction coefficient at blank/punch interface, gap between die rim block and blank holder and die entrance radius in the process of hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure (HDDRP) were determined. A Finite Element (FE) model was developed for simulating the HDDRP process. After validation of the developed FE model by experimental results, by combining FE simulation with Taguchi method and using the analysis of variance test, the effect of mentioned parameters on the formability of the hydroformed cups was investigated. The applied materials were pure copper and St14 steel sheets. The results of analysis indicated that for both cases of maximum thinning ratio at the constant value of cup draw depth and maximum accessible draw depth, fluid pressure has the greatest influence on the formability of part in sheet hydroforming process. Moreover, using rough punch, having smaller gap between die rim block and blank holder or increasing the die entrance radius, the formability of sheet will improve.*

Key Words Hydrodynamic deep drawing; Finite element simulation; Taguchi technique;Analysis of variance.

★تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۱/۱٦ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۹/۲۱ می‌باشد.

(۱) دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل.

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل.

(۳) استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل.

(٤) استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل.

مقدمه

با گسترش و توسعه‌ی صنعت اتومبیل‌سازی و هوا و فضا، نیاز به تولید قطعاتی که هندسه ی پیچیده دارند و استفاده از آلیاژهای سبک افزایش یافته است. هیدروفرمینگ ورق یکی از روش‌های پیشرفته‌ای است که قابلیت تولید قطعات با هندسه‌ی پیچیده و از آلیاژهای سبک را تسهیل کرده است. در مقایسه با کشش عمیق معمولی، فرآیند هیدروفرمینگ ورق دارای مزایای زیادی هم‌چون نسبت کشش بالا، قابلیت شکل‌دهی قطعات پیچیده، دقت ابعادی بالا، کیفیت سطحی به‌تر و هزینه‌ی ابزار پایین می‌باشد [1-4]. اگرچه این فرآیند مزایای زیاد و چشم‌انداز کاربردی فراوانی دارد، اما استفاده از سیال به‌عنوان واسط شکل‌دهی، منجر به پیچیدگی بالای این فرآیند گردیده است و در مقایسه با کشش عمیق معمولی، تعداد پارامترهای بیش‌تری رفتار شکل‌پذیری ورق را در فرآیند هیدروفرمینگ تحت تأثیر قرار می‌دهند. در صورتی که این پارامترها به‌طور مناسبی انتخاب نشوند، ورق دچار عیوبی هم‌چون چروکیدگی یا پارگی خواهد شد. بنابراین، برای به‌دست آوردن قطعات با کیفیت مطلوب، مطالعه‌ی دقیق و آگاهی از میزان تأثیر هر یک از پارامترها بر رفتار شکل‌پذیری ورق فلزی امری ضروری می‌باشد.

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی بر فرآیند هیدروفرمینگ و پارامترهای مؤثر بر آن انجام گرفته است. هسو و هسیه [5] روابطی را برای پیدا کردن مکان هندسی دو فشار بحرانی و به‌دست آوردن محدوده‌ی کاری ارائه دادند و تأثیر توان کارسختی و ضریب ناهمسان‌گردی را بر نمودارهای حد بالایی و پایینی فشار به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. ال- سبای و ملر [6] نشان دادند که برای به‌دست آوردن بالاترین نسبت کشش فشار سیال بالا مورد نیاز است، البته فشار بیش از حد می‌تواند منجر به پارگی ورق در ناحیه‌ی ورودی قالب گردد. ژانگ و همکاران [7] نشان دادند که فشار پیش بشکه‌ای بر توزیع ضخامت قطعه‌کار تأثیر دارد و از چروکیدگی آن جلوگیری می‌کند. لی یو و همکاران [8] برای افزایش نسبت کشش، فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مستقل را پیشنهاد دادند. آنان با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، تأثیر مسیر فشارهای مختلف را بر توزیع ضخامت و کیفیت قطعات شکل‌داده‌شده مورد بررسی قرار دادند.

با این وجود، تمامی تحقیقات ارائه‌شده به بررسی مجزای پارامترها پرداخته‌اند و لازم است که تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار شکل‌پذیری ورق فلزی در فرآیند هیدروفرمینگ ورق به‌صورت هم‌زمان مورد ملاحظه قرار گیرد. هم‌چنین، بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند می‌تواند بر اساس میزان تأثیر و درجه‌ی اهمیت هر پارامتر بر خواص نهایی قطعه‌کار صورت گیرد. هدف این مقاله، توسعه‌ی یک روش اصولی برای مطالعه و تحلیل تأثیر پارامترهای شکل‌دهی بر کیفیت شکل‌پذیری قطعات و به‌دست آوردن ترکیب بهینه‌ی این پارامترها در فرآیند هیدروفرمینگ ورق می‌باشد. در این مقاله، با به‌کارگیری شبیه‌سازی اجزای محدود و تکنیک تاگوچی به‌همراه تحلیل واریانس (ANOVA) میزان تأثیر و درجه‌ی اهمیت پارامترهای کلیدی شکل‌دهی هم‌چون فشار سیال محفظه‌ی شکل‌دهی، ضریب اصطکاک سطح تماس سنبه و ورق، فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی محیطی قالب با سطح ورق‌گیر و شعاع ورودی قالب در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مورد بحث قرار گرفته است. مدل اجزای محدود فرآیند شکل‌دهی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS 6.7.1 ایجاد گردیده است. مدل اجزای محدود بعد از تأیید درستی و مطابقت آن با نتایج تجربی برای انجام آزمایش‌ها طراحی‌شده توسط آرایه‌ی متعامد تاگوچی مورد استفاده قرار گرفته است. به‌منظور به‌دست آوردن میزان تأثیر و درجه‌ی

اهمیت هر یک از پارامترها و ترکیب بهینه‌ی پارامترها نتایج شبیه‌سازی‌ها به‌عنوان ورودی برای آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شده‌اند.

اصول و روش کار

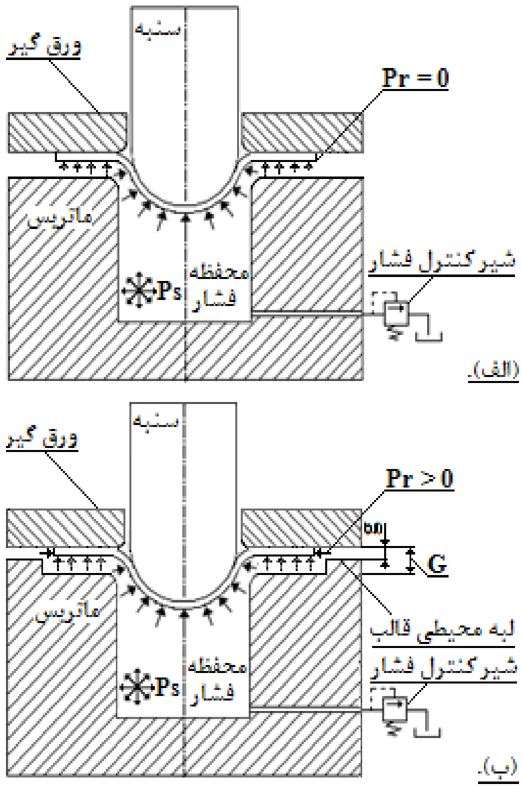
در مسایل مهندسی، به علت بالابودن تعداد پارامترهای مؤثر، طرح‌ریزی آزمایش‌ها با در نظر گرفتن تمامی فاکتورها به‌همراه سطوح متناظر با آن‌ها، منجر به بالا رفتن تعداد ترکیبات و شرایط آزمایشی ممکن می‌شود و در نتیجه هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. برای کاهش تعداد آزمایش‌ها، روش مرسوم استفاده از آزمایش‌ها فاکتوریلی جزئی است. تاگوچی مجموعه‌ی ویژه‌ای از طرح‌های کلی برای آزمایش‌های فاکتوریلی ایجاد کرده است. آرایه‌های متعامد استاندارد جزئی از این طراحی‌ها می‌باشد. استفاده از آرایه‌های متعامد منجر به کم‌شدن تعداد آزمایش‌های لازم می‌گردد، در حالی که هم‌چنان می‌توان بیش‌ترین اطلاعات را از نتایج آزمایش‌ها استخراج کرد. برای رسیدن به کیفیت مطلوب محصول، تاگوچی فرآیند سه مرحله‌ای را پیشنهاد کرد که شامل طراحی سیستم‌ها، طراحی پارامتر و طراحی تلرانس می‌باشد. طراحی سیستم‌ها شامل به‌کارگیری علوم و اطلاعات مهندسی برای تولید یک محصول می‌باشد. در پایان این مرحله، پارامترهای مهم شناسایی می‌شود و سطوح کاری مناسبی برای هر یک از آن‌ها تعیین می‌گردد. در مرحله‌ی طراحی پارامتر، سطوح بهینه‌ی هر پارامتر که باعث به‌ترین عملکرد از محصول/ فرآیند می‌شوند تعیین می‌گردند. شرایط بهینه طوری انتخاب می‌شوند که تأثیر فاکتورهای غیرقابل‌کنترل باعث حداقل تغییرات در عملکرد سیستم و کیفیت محصولات خروجی گردد. در مرحله‌ی طراحی تلرانس، در اثر محدودکردن تلرانس فاکتورهایی که تأثیر عمده‌ای بر خواص نهایی محصول دارند، می‌توان کیفیت محصول را افزایش داد [9,10].

هدف این مقاله، بررسی تأثیر پارامترهای شکل‌دهی بر شکل‌پذیری ورق در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی برای به‌دست آوردن قطعات با کیفیت نهایی به‌تر می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، ابتدا پارامترهای شکل‌دهی و مشخصه‌های ارزیابی انتخاب‌شده و آرایه‌ی استاندارد مناسب تاگوچی ایجاد گردیده است. مدل اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS 6.7.1 ایجاد گردیده است. بعد از اثبات تجربی درستی مدل توسعه‌داده‌شده، شبیه‌سازی‌ها بر اساس آزمایش‌های طراحی‌شده توسط آرایه‌ی استاندارد تاگوچی اجرا گردیده‌اند. در ادامه نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها به نسبت‌های S/N (سیگنال به نویز) تبدیل شده و برای مشخص‌کردن پارامترهای مهم تأثیرگذار، آنالیز آماری واریانس (ANOVA) بر نتایج به‌دست آمده اجرا گردیده است. بدین ترتیب، می‌توان پارامترهایی را که تأثیر عمده‌ای بر کیفیت نمونه‌ی شکل‌داده‌شده دارند، شناسایی کرد و هم‌چنین ترکیب بهینه‌ای را از پارامترهای مورد مطالعه به‌دست آورد. به‌منظور بررسی و مطالعه‌ی جامع‌تر، روند فوق بر قطعات شکل‌داده‌شده با ورق‌های از دو جنس مس خالص و فولاد St14 پیاده‌سازی گردیده است.

روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی

کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی یکی از روش‌های جدید هیدروفرمینگ ورق می‌باشد که برای شکل‌دهی سرد قطعات با نسبت کشش بالا و از جنس‌های با شکل‌پذیری پایین، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در شکل (۱-الف) روش کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی نشان داده شده است. روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، تنها با

اعمال اندک تغییرات بر فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی به‌دست آمده است. همان‌طور که از شکل (۱-ب) می‌توان مشاهده کرد، در این روش ورق توسط سنبه به داخل محفظه‌ی قالب که پر از سیال است، کشیده می‌شود و هم‌زمان سیال فشرده‌شده‌ی ورق را به سطح سنبه می‌چسباند. ضمن حرکت سنبه به سمت پایین، سیال از فاصله‌ی بین لبه‌ی کناری قالب و ورق‌گیر (g) به سمت بیرون جریان می‌یابد، اما به علت این که این فاصله به دلیل ایجاد یک لبه محیطی بر روی قالب خیلی کوچک است، نشت سیال را به سمت بیرون به تأخیر می‌اندازد و جریان سیال باعث ایجاد یک فشار شعاعی بر لبه‌های ورق می‌گردد. ایجاد این فشار شعاعی تفاوت این روش با روش کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی می‌باشد [11].



شکل ۱-الف کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی ب- کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی

با توجه به مزایای قابل‌توجه فرآیند فوق و هم‌چنین به دلیل این که این فرآیند شامل پارامترهای تأثیرگذار بیش‌تری نسبت به سایر فرآیندهای هیدروفرمینگ ورق می‌باشد، در این مقاله از روش فوق برای پیاده‌سازی روند ارائه‌شده در بخش پیشین استفاده شده است.

انتخاب پارامترها و ایجاد آرایه‌ی استاندارد

به‌طور کلی سه نوع تقسیم‌بندی برای پارامترهای تأثیرگذار بر روی شکل‌پذیری ورق در فرآیند هیدروفرمینگ وجود دارد که عبارتند از پارامترهای هندسی، پارامترهای مواد و پارامترهای فرآیندی. از میان پارامترهای فوق بر اساس مراجع [12,13] برای یک ماده‌ی مشخص، پارامترهای مواد هم‌چون توان کرنش سختی، نسبت تنش اسمی و نسبت ناهمسان‌گردی تأثیر خیلی کمی بر روی شکل‌پذیری ورق در مقایسه با پارامترهای هندسی و پارامترهای فرآیندی دارند. به‌علاوه، در بیش‌تر موارد برای یک قطعه‌کار خاص، انعطاف‌پذیری بسیار کمی در تغییر پارامترهای ماده وجود دارد. بنابراین، در این مقاله مطالعه‌ی پارامترهای هندسی و پارامترهای فرآیندی مورد توجه قرار گرفته است. از جمله پارامترهای فرآیندی و هندسی که فرآیند هیدروفرمینگ ورق را تحت تأثیر قرار می‌دهند می‌توان به فشار محفظه‌ی سیال، فشار پیش‌بشکه‌ای، شرایط اصطکاکی بین ورق و اجزای مختلف قالب، شعاع ورودی قالب، شعاع ورودی ورق‌گیر، ضخامت ورق و غیره اشاره کرد. هم‌چنین همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد، در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی و درنتیجه محدودکردن فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی قالب و ورق‌گیر (g)، یک فشار شعاعی بر لبه‌های ورق حین شکل‌دهی اعمال می‌شود. بنابراین، اندازه‌ی این فاصله نیز می‌تواند با تحت تاثیر قرار دادن میزان فشار شعاعی اعمال‌شده بر لبه‌های ورق، شکل‌پذیری ورق را تحت

تأثیر قرار دهد. از این رو، در این مقاله پارامتر فوق به همراه سه پارامتر فشار سیال محفظه‌ی شکل‌دهی (P)، ضریب اصطکاک سطح تماس سنبه و ورق (μ) و شعاع ورودی قالب (R) به‌عنوان پارامترهای ورودی برای طراحی آزمایش‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. پارامترهای مورد ارزیابی به‌همراه سطوح انتخاب‌شده برای هریک از آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. سطوح درنظرگرفته شده برای پارامترهای فوق بر اساس پنجره‌ی فرآیند می‌باشد و دامنه‌ی کلی فاکتورها به گونه‌ای انتخاب شده است که قطعات شکل‌داده‌شده عاری از هر گونه عیوب نشان‌داده‌شده در شکل (۲) باشند. به‌عنوان مثال در جدول (۱) سطح اول انتخاب‌شده برای پارامتر فشار (فشار ۱۰ MPa) حداقل فشار نهایی لازم برای شکل‌دهی قطعه‌کار سالم (بدون عیب چروکیدگی) در آزمایش‌های تجربی می‌باشد. یا به‌عنوان مثالی دیگر، سطوح انتخابی برای پارامتر ضریب اصطکاک به‌صورتی است که اصطکاک از کم‌ترین مقدار ممکن (μ =۰/۰۸) تا شرایط اصطکاک خشک (μ =۰/۲۰) تغییر می‌کند. برای مطالعه‌ی اثرات چهار فاکتور در سه سطح $3^4 = 81$ ترکیب ممکن از موقعیت‌های آزمایشی وجود خواهد داشت، اما با استفاده از آرایه‌ی متعامد استاندارد تاگوچی (L-9)، که برای طراحی آزمایش با داشتن چهار فاکتور با سه سطح کاری مناسب است می‌توان تعداد موقعیت‌های آزمایشی را به عدد ۹ کاهش داد. آرایه‌ی متعامد (L-9) همراه با مکان فاکتورها و سطوح انتخابی آن‌ها در جدول (۲) آمده است که ستون اول شماره‌ی آزمایش و ستون‌های بعدی سطح هر یک از فاکتورها را برای هر یک از موقعیت‌های آزمایشی نشان می‌دهد.

به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای فوق، قطعات استوانه‌ای- نیم‌کروی از ورق‌های از جنس مس خالص و فولاد St14 با استفاده از فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی شکل‌دهی گردیده‌اند. برای اندازه‌گیری کیفیت شکل‌دهی، دو معیار مجزا از هم انتخاب شده است به‌طوری‌که، در ابتدا معیار عمومی بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی برای یک عمق کشش ثابت مورد استفاده قرار گرفته است و آزمایش‌ها برای یک عمق کشش ثابت اجرا گردیده‌اند و بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در نواحی بحرانی اندازه‌گیری شده است.

جدول ۱ پارامترهای فرآیندی و هندسی و سطوح متناسب هر یک از پارامترها

پارامتر	سطوح		
	1	2	3
F_1: فشار شکل‌دهی P (MPa)	10.0	20.0	30.0
F_2: ضریب اصطکاک μ	0.08	0.14	0.20
F_3: گپ g (mm)	0.00	0.05	0.10
F_4: شعاع ورودی قالب (mm)	3.00	4.00	5.00



شکل ۲ نمونه‌ای از عیوب ایجادشده در آزمایش‌ها تجربی انجام‌شده در این پژوهش
(الف- عیوب چروکیدگی ب- عیوب پارگی)

جدول ۲ آرایه‌ی متعامد استاندارد تاگوچی (L-9)

شماره‌ی آزمایش	پارامتر			
	P (MPa)	μ	g (mm)	R (mm)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

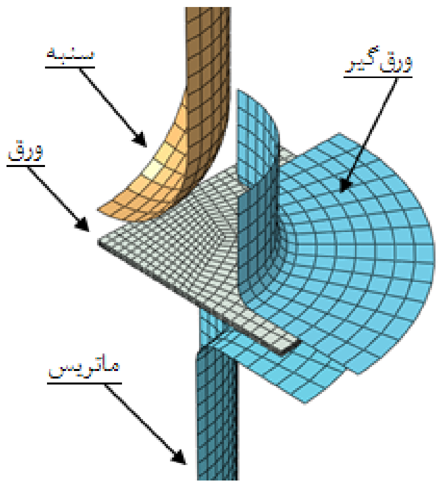
نسبت نازک‌شدگی به‌صورت زیر تعریف می‌شود [12]:

$$\text{Thining ratio } (\%) = \frac{t_0 - t_1}{t_0} \times 100 \qquad (۱)$$

بار دوم بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی به‌عنوان مشخصه‌ی ارزیابی انتخاب شده است و آزمایش‌ها یک بار دیگر برای رسیدن به بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی تکرار گردیده‌اند.

شبیه‌سازی اجزای محدود

شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS 6.7.1 انجام گرفته است. شکل (۳) مدل اجزای محدود ایجادشده را نشان می‌دهد. به‌علت تقارن فقط ۱/٤ ورق و تجهیزات مدل‌سازی شده است. ورق به‌صورت تغییرشکل‌پذیر مدل شده و برای مش‌بندی آن از المان‌های C3D8R استفاده گردیده است. جنس ورق‌های مورداستفاده در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی، مس خالص و فولاد St14 با ضخامت یک میلی‌متر می‌باشد. به‌منظور تعیین خواص مکانیکی ورق‌های مورداستفاده، طبق استاندارد ASTM E8M (2008) نمونه‌هایی در سه راستای مختلف (۰°، ٤٥° و ۹۰°) نسبت به جهت نورد ورق‌ها آماده‌سازی شده است و آزمون کشش تک‌محوره در سه راستا انجام گردید. نتایج حاصل از این آزمون جهت تعیین خواص مکانیکی و رفتار ناهمسان‌گردی ورق‌های فوق مورد استفاده قرار گرفت. خواص مکانیکی به‌دست آمده از این آزمون در جدول (۳) آمده است.



شکل ۳ مدل اجزای محدود ایجادشده در نرم‌افزار

جدول ۳ مشخصات مکانیکی و فیزیکی مواد

پارامتر	مس خالص	فولاد St14
مدول الاستیسیته E (GPa)	117	210
ضریب پوآسون ν	0.32	0.30
استحکام تسلیم σ (MPa)	116	175
توان کرنش سختی n	0.44	0.36
ناهمسان‌گردی نرمال $\bar{R}$	1	1.53
چگالی ρ (Kg/m3)	8940	7850

بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها این نتیجه حاصل شد که ورق‌های مسی رفتار همسان‌گردی در هر سه راستای اندازه‌گیری نسبت به جهت نورد دارند، در حالی که برای ورق‌های St14 ضرایب ناهمسان‌گردی مطابق مقادیر ارائه‌شده در جدول (٤) به‌دست آمد. در نرم‌افزار ABAQUS امکان معرفی مستقیم ضرایب ناهمسان‌گردی وجود ندارد [15].

بنابراین، برای در نظر گرفتن ناهمسان‌گردی ورق در شبیه‌سازی، با توجه به تابع تسلیم هیل برای یک ماده‌ی ناهمسان‌گرد به جای نسبت‌های فوق از نسبت تنش‌های تسلیم ناهمسان‌گردی ارائه‌شده در جدول (۵) استفاده شده است. مقادیر ارائه شده در جدول (۵) براساس ضرایب ناهمسان‌گردی نشان داده شده در جدول (٤) به‌دست آمده‌اند. سایر تجهیزات به‌صورت صلب مدل شده‌اند و از المان‌های R3D4 برای مش‌بندی آن‌ها استفاده شده است. ضریب اصطکاک سطح تماس ورق با ورق‌گیر و هم‌چنین ورق با قالب، ۰/۰۵ فرض شده است. برای سطح تماس بین سنبه و ورق بر اساس سطح انتخاب‌شده در طراحی آزمایش‌ها، ضریب اصطکاک می‌تواند یکی از مقادیر ۰/۰۸، ۰/۱٤ و یا ۰/۲۰ باشد. نوع تماس بین ورق و سطوح قالب در شبیه‌سازی از نوع سطح‌به‌سطح انتخاب شده است.

جدول ٤ ضرایب ناهمسان‌گردی فولاد St14.

راستا	R0	R45	R90	R12
مقدار	1.36	1.78	1.22	1.53

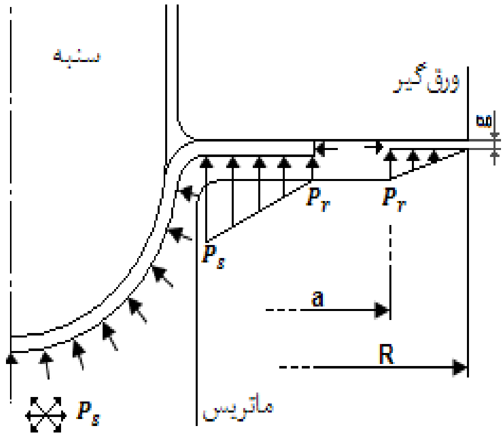
یکی از مهم‌ترین پارامترها در شبیه‌سازی فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، فشار محفظه و تغییرات آن در سطح زیرین ورق می‌باشد که در شکل (٤) نشان داده شده است. علاوه بر این، در فرآیند فوق، با تغییر میزان فاصله‌ی (gap) بین سطح لبه محیطی قالب و سطح ورق‌گیر مقدار فشار شعاعی اعمال‌شده بر لبه‌های ورق نیز تغییر می‌کند. معادله‌ی (۲) رابطه‌ی بین فشار شعاعی اعمال‌شده بر لبه‌های ورق با سایر پارامترهای قالب را نشان می‌دهد [15]:

جدول ۵ نسبت‌های تنش تسلیم فولاد St14.

ضرایب	R11	R22	R33	R12	R13	R23
مقدار	1	0.97	1.05	0.85	1	1

$$P_r = \frac{6\eta Q}{\pi g^3}\ln\left(\frac{R}{a}\right) \qquad (۲)$$

در این رابطه Q جریان سیال، η ویسکوزیته سیال و g فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی محیطی قالب با سطح ورق‌گیر می‌باشد. هم‌چنین R شعاع خارجی و a شعاع داخلی لبه‌ی محیطی قالب می‌باشد که در شکل (٤) نشان داده شده‌اند. در معادله‌ی بالا فشار اعمال‌شده بر لبه‌های ورق با عکس توان سوم g رابطه دارد. بنابراین، با تغییرات جزئی در این پارامتر، فشار شعاعی دست‌خوش تغییرات فراوانی می‌شود. برای بررسی تأثیرات این پارامتر، سطوح انتخاب‌شده طوری تنظیم شده است که فرآیند از حالت فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار یک‌نواخت روی لبه‌های ورق (فشار شعاعی برابر با فشار محفظه‌ی سیال) تا حالت کشش عمیق هیدرودینامیکی معمولی (فشار شعاعی صفر) تغییر می‌کند. بدین ترتیب، آزمایش‌های طراحی‌شده می‌تواند سه فرآیند مختلف هیدروفرمینگ ورق را تحت پوشش قرار دهد. هم‌چنین برای مطالعه تأثیر فشار محفظه، سه مسیر فشار با فشارهای نهایی متفاوت انتخاب گردیده‌اند. با توجه به شکل (٤)، در طول فرآیند شکل‌دهی فشار سیال درون محفظه، فشار سیال در ناحیه فلانج و فشار شعاعی اعمال‌شده به لبه‌ی ورق در هر لحظه تابعی از مختصات و زمان می باشند. بنابراین، امکان اعمال مستقیم آن‌ها در مدل ایجادشده اجزای محدود وجود نداشت. نرم‌افزار ABAQUS قابلیت ارتباط با نرم‌افزار فرترن را دارد. بنابراین، برای اعمال فشار سیال و تغییرات آن در سطح زیرین ورق و هم‌چنین تغییرات فشار شعاعی اعمال‌شده بر لبه‌ی ورق، زیر روال مرتبط با آن (VDLOAD) در نرم‌افزار فرترن نوشته شده است و هنگام اجرای شبیه‌سازی‌ها با مدل ایجاد شده توسط نرم‌افزار ABAQUS ترکیب می‌شود.



شکل ٤ الگوی رفتاری تغییرات فشار سیال در ناحیه‌ی فلانج با تغییرات فشار شعاعی

طبق مراجع [16,17] در این پژوهش نیز از حداکثر مقدار نازک‌شدگی t_f برای بررسی پارگی در قطعات شبیه‌سازی‌شده استفاده گردیده است. حداکثر مقدار نازک‌شدگی با استفاده از کرنش ضخامتی در شرایط کرنش صفحه‌ای از دیاگرام حد شکل‌دهی به‌صورت رابطه‌ی (٣) به‌دست می‌آید [17]:

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t_f}{t_0}\right) \quad \text{یا} \quad t_f = t_0 \exp(\varepsilon_t) \tag{٣}$$

در رابطه‌ی (٣)، t_0 ضخامت اولیه‌ی ورق و t_f ضخامت نهایی ورق در لحظه گلویی می‌باشد.

کرنش مهندسی اصلی، e_θ، در شرایط کرنش صفحه‌ای توسط گروه تحقیقاتی کشش عمیق امریکای شمالی (North American Deep Drawing Research Group) به‌طور تقریبی به‌صورت رابطه‌ی (٤) به‌دست آمده است [17]:

$$e_\theta = FLD_0 = \left(23.3 + \frac{360}{25.4} t_0\right)\left(\frac{n}{0.21}\right) \tag{٤}$$

که در آن FLD_0 کرنش مهندسی اصلی در شرایط کرنش صفحه‌ای، n نمای کرنش سختی و e_θ کرنش مهندسی می‌باشد. با توجه به رابطه‌ی (٥) کرنش مهندسی را می‌توان به کرنش حقیقی تبدیل کرد:

$$\varepsilon_\theta = \ln(1 + e_\theta) \tag{٥}$$

با در نظر گرفتن اصل ثابت‌بودن حجم و با توجه به این که $\varepsilon_z = 0$، رابطه‌ی (٦) قابل دست‌یابی می‌باشد:

$$\varepsilon_\theta + \varepsilon_z + \varepsilon_t = 0 \quad => \quad \varepsilon_t = -\varepsilon_\theta \tag{٦}$$

هم‌چنین حداکثر نازک‌شدگی از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\%thinning = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \tag{٧}$$

با توجه به مقادیر ارائه‌شده در جدول (٣) و استفاده از روابط (٣-٧) حداکثر نازک‌شدگی مجاز برای ورق‌های مسی و فولاد St14 به ترتیب ٤٤٪ و ٣٩.١١٪ به‌دست آمده است.

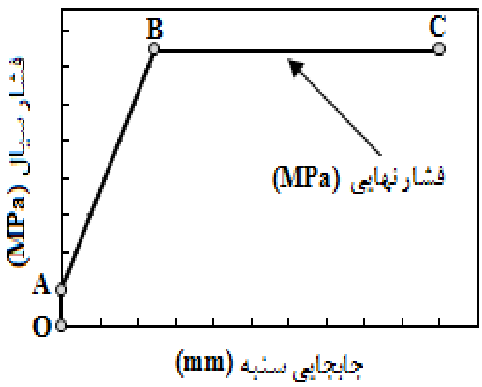
مراحل آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌ها، از یک دستگاه تست انیورسال DMG (Denison Mayers Group) با ظرفیت ٦٠٠KN استفاده شده است. این دستگاه در طول انجام آزمایش‌ها متصل به یک واحد کامپیوتری می‌باشد و تمامی عملیات دستگاه توسط آن واحد کنترل می‌شود. شکل (٥) دستگاه تست انیورسال، واحد هیدرولیکی و مجموعه قالب ساخته‌شده برای انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در طول فرآیند شکل‌دهی فشار سیال داخل محفظه در هر لحظه توسط یک شیر کنترل فشار الکترونیکی، کنترل می‌شود و به کامپیوتر متصل به آن بازخورد داده می‌شود. به این طریق می‌توان از درستی مسیر فشار اعمال‌شده اطمینان حاصل کرد. شکل (٦)

نمونه‌ای از مسیر فشار اعمال‌شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در اجرای تمامی آزمایش‌ها این پژوهش از این منحنی فشار استفاده شده است. در این منحنی قسمت OA و AB برای تمامی آزمایش‌ها ثابت بود و تنها فشار نهایی (قسمت BC) بر حسب سطوح انتخاب شده برای پارامتر فشار (جدول ۲) تغییر می‌کرد. برای مطالعه‌ی تأثیر پارامترهای نام‌برده‌شده در بخش ٤، قطعات استوانه‌ای- نیم‌کروی از گرده‌هایی از جنس مس خالص و فولاد St14، با قطر اولیه ۸۰mm و ضخامت ۱mm، شکل داده شده‌اند. در شکل (۷) نمونه‌هایی از قطعات شکل داده شده در آزمایش‌ها نشان داده شده است. جنس سیال مورداستفاده در آزمایش‌ها روغن SAE 10 می‌باشد.



شکل ۵ الف- دستگاه پرس و واحد هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایش‌ها ب- مجموعه قالب ساخته شده

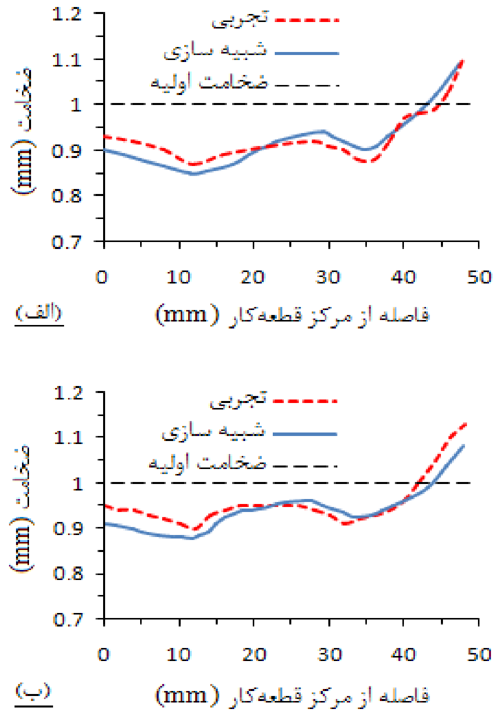


شکل ٦ نمونه‌ای از مسیر فشار اعمال‌شده در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی.



شکل ۷ قطعات شکل‌داده‌شده در آزمایش‌های تجربی (الف)- مس خالص، (ب)- فولاد St14

برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود، توزیع ضخامت قطعات شکل‌داده‌شده در آزمایش‌ها با نمودار تغییرات ضخامت به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود برای هر دو جنس مورد بررسی با نتایج تجربی مطابقت خوب و قابل قبولی دارد. ازاین‌رو، مدل اجزای محدود ایجادشده می‌تواند برای انجام آزمایش‌های نشان‌داده‌شده در جدول (۲) مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۸ مقایسه منحنی توزیع ضخامت بدست آمده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی (الف- نمونه از جنس مس خالص، ب- نمونه از جنس فولاد St14)

نتایج و بحث

با توجه به این که در این مقاله از دو مشخصه‌ی ارزیابی مجزا برای بررسی تأثیر پارامترهای نشان‌داده‌شده در جدول (۱) استفاده شده است، بنابراین شبیه‌سازی آزمایش‌های طراحی‌شده با استفاده از آرایه‌ی استاندارد تاگوچی برای هر دو جنس مورداستفاده دو بار اجرا شده است. بار اول عمق کشش ثابت اجرا گردید و بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی به عنوان معیار ارزیابی در نظر گرفته شد. در بار دوم بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی به‌عنوان مشخصه‌ی ارزیابی درنظر گرفته شد و شبیه‌سازی‌ها برای به‌دست آوردن بیش‌ترین عمق کشش برای هر دسته پارامتر ورودی آرایه‌ی متعامد تکرار گردیدند. در ادامه نتایج به‌دست آمده برای دو مشخصه‌ی ارزیابی ذکرشده به نسبت‌های S/N تبدیل شد و آنالیز واریانس (ANOVA) برای شناسایی پارامترهایی که بیش‌ترین تأثیر را دارند، بر نتایج به‌دست آمده اجرا گردید.

آنالیز S/N عموماً مشخصه‌ی ارزیابی می‌تواند یکی از سه مشخصه‌ی کیفی کوچک‌تر- به‌تر، بزرگ‌تر- به‌تر و مقدار اسمی- به‌تر باشد. در روش تاگوچی برای اندازه‌گیری انحراف مشخصه‌ی ارزیابی از مقدار مطلوب آن از نسبت S/N استفاده می‌گردد. نسبت S/N به‌صورت زیر تعریف می‌شود [9]:

$$S/N = -10\log(MSD) \qquad (۸)$$

که در این رابطه MSD میانگین مربعات انحرافات از مشخصه‌ی کیفی می‌باشد.

مشخصه‌ی ارزیابی بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی، مشخصه‌ی ارزیابی با تابع هدف کوچک‌تر- به‌تر می‌باشد. در حالی که بیش‌ترین عمق قابل‌کشش مشخصه‌ی ارزیابی با تابع هدف بزرگ‌تر- به‌تر می‌باشد. میانگین مربعات انحراف برای مشخصه‌ی ارزیابی کوچک‌تر- به‌تر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MSD = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2 \qquad (۹)$$

در این رابطه y_i مقدار مشخصه‌ی ارزیابی کوچک‌تر- به‌تر است و n تعداد تست‌ها برای یک شرایط آزمایشی می‌باشد. بیش‌ترین عمق کشش قابل‌دست‌یابی، مشخصه‌ی ارزیابی با تابع هدف بزرگ‌تر- به‌تر می‌باشد. میانگین مربعات انحراف برای مشخصه‌ی ارزیابی بزرگ‌تر- به‌تر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MSD = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_i^2} \qquad (۱۰)$$

در این رابطه y_i مقدار مشخصه‌ی ارزیابی بزرگ‌تر- به‌تر، و n تعداد تست‌ها برای یک شرایط آزمایشی می‌باشد.

آنالیز واریانس (ANOVA). برای بررسی تأثیر کمی پارامترهای موردمطالعه، آنالیز واریانس بر روی نتایج اجرا گردیده است. در این روش با مقایسه‌ی واریانس، تأثیر پارامترهای مختلف ارزیابی می‌گردد [18]. مجموع مربعات کل ناشی از انحراف از میانگین کلی S/N به‌صورت زیر می‌باشد:

$$SS_T = \sum_{i=1}^{m}\left(\frac{S}{N}\right)_i^2 - \frac{1}{m}\left[\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{S}{N}\right)_i\right]^2 \qquad (۱۱)$$

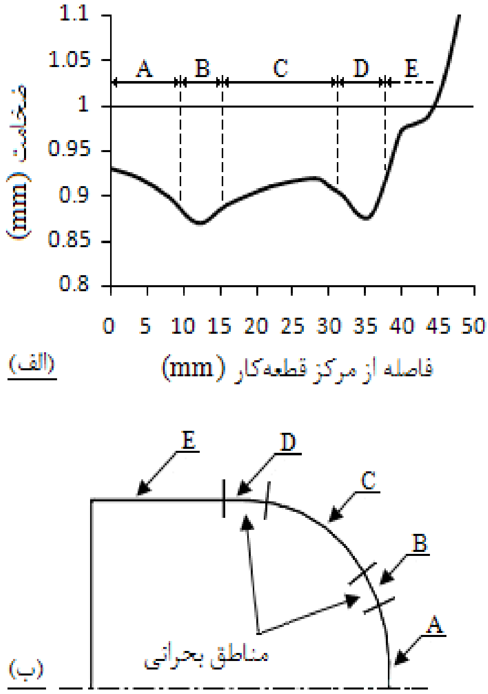
که در این رابطه m تعداد کل آزمایش‌ها می‌باشد. مجموع مربعات کل ناشی از انحراف از میانگین کلی S/N برای فاکتور P از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$SS_P = \sum_{j=1}^{l}\frac{\left(\overline{\left(\frac{S}{N}\right)_j}\right)^2}{t} - \frac{1}{m}\left[\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{S}{N}\right)_i\right]^2 \qquad (۱۲)$$

در رابطه‌ی بالا l تعداد سطوح فاکتور p (در این مقاله l=3)، t تعداد آزمایش‌ها برای فاکتور p در سطح j و $\overline{\left(\frac{S}{N}\right)_j}$ میانگین نسبت S/N برای فاکتور p در سطح j می‌باشد. درصد مشارکت فاکتور p را با استفاده از رابطه‌ی زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$P_p(\%) = \frac{SS_P}{SS_T} \times 100 \qquad (۱۳)$$

بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی. آزمایش‌ها برای هر دسته از پارامترهای ورودی آرایه‌ی متعامد تاگوچی برای یک عمق کشش ثابت اجرا گردیده‌اند و بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی متناظر با هر دسته پارامتر ورودی، از نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها استخراج شده است. بر اساس توزیع ضخامت به‌دست آمده از نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی، قطعه‌کار استوانه‌ای- نیم‌کروی را می‌توان به چندین ناحیه تقسیم‌بندی کرد. همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، برای قطعه‌کار استوانه‌ای- نیم‌کروی دو ناحیه‌ی بحرانی B و D قابل شناسایی است که نازک‌شدگی در این دو منطقه قابل توجه است و می‌تواند منجر به خرابی زودرس در قطعه‌کار گردد (قبلاً نمونه‌ای از این خرابی در دو ناحیه‌ی ذکرشده در شکل (۲-ب) نشان داده شد). بنابراین، برای بررسی میزان تأثیر پارامترهای موردمطالعه، آنالیز واریانس به طور مجزا بر روی نتایج بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی به‌دست آمده در این دو ناحیه‌ی بحرانی اجرا گردیده است.



شکل ۹ تقسیم‌بندی قطعه‌ی استوانه‌ای- نیم‌کروی بر اساس منحنی توزیع ضخامت (الف- منحنی توزیع ضخامت قطعه، ب- تقسیم‌بندی نواحی مختلف نمونه

جدول‌های (۷ و ٦) بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی و نسبت S/N متناظر را به‌ترتیب برای دو ناحیه‌ی بحرانی B و D در ۹ شرایط آزمایشی مختلف برای دو جنس مس خالص و فولاد St14 نشان می‌دهد. برای به‌دست آوردن درجه‌ی اهمیت و میزان تأثیر هر یک از فاکتورها بر بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در نواحی بحرانی، آنالیز واریانس (ANOVA) بر روی نتایج نشان‌داده‌شده در جدول‌های (۷ و ٦) اجرا گردیده است. از آنجایی که کم‌ترین نسبت نازک‌شدگی در

نواحی B و D مطلوب‌تر است مشخصه‌ی ارزیابی کوچک‌تر- به‌تر برای تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت. جدول‌های (۹ و ۸) میانگین نسبت S/N سطوح مختلف هر یک از فاکتورها را در ناحیه‌ی بحرانی B نشان می‌دهد. هم‌چنین نتایج آنالیز واریانس برای بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B در جدول‌های (۱۱ و ۱۰) آمده است. بر اساس جدول‌های (۱۱ و ۱۰) نتایج به‌دست آمده برای هر دو جنس موردبررسی تقریباً روند مشابهی دارند و می‌توان مشاهده کرد که پارامترهای فشار سیال و ضریب اصطکاک سطح تماس سنبه با ورق به ترتیب تأثیرگذارترین پارامترها بر بیش‌ترین نازک‌شدگی در ناحیه B می باشند. پس از آن‌ها پارامتر فاصله‌ی بین لبه‌ی محیطی قالب و ورق‌گیر g (فشار شعاعی) نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B را تحت تأثیر قرار خواهد داد. تأثیر شعاع ورودی قالب بر بیش‌ترین نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B در مقایسه با سایر پارامترها بسیار کم می‌باشد به همین علت این فاکتور حذف (ادغام) شده و تغییرات ناشی از آن به عنوان جزء خطا در نظر گرفته شده است.

جدول ٦ بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در منطقه‌ی بحرانی B و نسبت S/N متناظر

شماره‌ی آزمایش	**بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی**			
	مس خالص		**فولاد St14**	
	S/N	Thin. R	S/N	Thin. R
1	17.4145	0.13467	17.1390	0.13901
2	17.9857	0.12610	17.7077	0.13020
3	18.3961	0.12028	18.0527	0.12513
4	18.9692	0.11260	18.5763	0.11781
5	19.9015	0.10114	19.3363	0.10794
6	22.2600	0.07709	21.4259	0.08486
7	17.9870	0.12608	17.7204	0.13001
8	21.0523	0.08859	20.9212	0.08993
9	20.3374	0.09619	20.0531	0.09939

جدول ۷ بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در منطقه‌ی بحرانی D و نسبت S/N متناظر

شماره‌ی آزمایش	**بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی**			
	مس خالص		**فولاد St14**	
	S/N	Thin R.	S/N	Thin. R
1	21.7786	0.08148	21.3403	0.08570
2	23.4969	0.06685	22.3108	0.07664
3	25.7333	0.05168	24.3048	0.06092
4	28.3885	0.03806	25.3471	0.05403
5	25.4176	0.05359	23.7004	0.06531
6	31.1890	0.02757	28.1898	0.03895
7	25.0360	0.05600	23.8971	0.06384
8	32.7307	0.02309	28.9490	0.03569
9	26.74234	0.04601	24.8172	0.05743

جدول ۸ میانگین نسبت S/N بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B برای سطوح مختلف فاکتورها (مس خالص)

پارامتر	**میانگین نسبت S/N**		
	سطح 1 (L-1)	سطح 2 (L-2)	سطح 3 (L-3)
F_1	17.9321	20.3769	19.7922
F_2	18.1236	19.6465	20.3311
F_3	20.2423	19.0974	18.7615
F_4	19.2178	19.4109	19.4725

جدول ۹ میانگین نسبت S/N بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B برای سطوح مختلف فاکتورها (فولاد St14)

پارامتر	**میانگین نسبت S/N**		
	سطح 1 (L-1)	سطح 2 (L-2)	سطح 3 (L-3)
F_1	17.6332	19.7795	19.5649
F_2	17.8119	19.3217	19.8439
F_3	19.8287	18.7790	18.3698
F_4	18.8428	18.9513	19.1834

جدول ۱۰ نتایج آنالیز ANOVA برای بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B (مس خالص)

پارامتر	درجه‌ی آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت
F_1	2	9.7789	46.2093
F_2	2	7.6617	36.2047
F_3	2	3.6153	17.0840
F_4^*	2	0.1064^*	0.5028
کل:	8	21.1622	100
خطا:	2	0.4254	

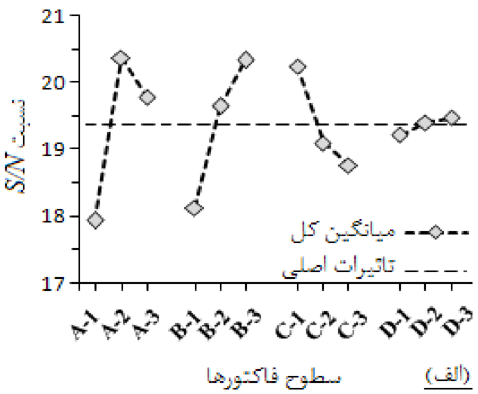
* فاکتور ادغام‌شده

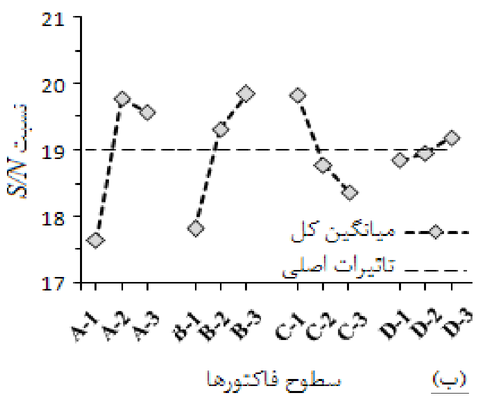
جدول ۱۱ نتایج آنالیز ANOVA برای بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B (فولاد St14).

پارامتر	درجه‌ی آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت
F_1	2	8.3844	44.9691
F_2	2	6.6811	35.8339
F_3	2	3.3976	18.2227
F_4^*	2	0.1816^*	0.9741
کل:	8	18.6448	100
خطا:	2	0.72654	

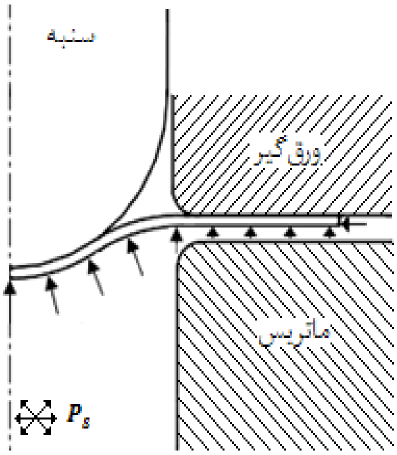
* فاکتور ادغام‌شده

شکل (۱۰) تأثیر اصلی هر یک از فاکتورها را بر بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی B نشان می‌دهد. در این شکل تغییرات (شیب) و دامنه‌ی منحنی‌های متناظر با هریک از پارامترها، درجه‌ی اهمیت آن پارامتر را بر نتیجه‌ی نهایی نشان می‌دهد. با توجه به این که نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها به نسبت‌های S/N تبدیل شده‌اند و مستقل از مشخصه‌ی ارزیابی انتخاب شده‌اند، نسبت S/N بالاتر سطح یک فاکتور نشان‌دهنده‌ی تأثیر مطلوب‌تر آن بر نتیجه‌ی نهایی می‌باشد. بنابراین، از شکل (۱۰) می‌توان مشاهده کرد که استفاده از فشار سیال بالاتر منجر به کاهش کم‌تر ضخامت در ناحیه‌ی بحرانی B خواهد شد. دلیل این امر، همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، این است که فشار سیال اعمال‌شده به سطح زیرین ورق به‌عنوان تکیه‌گاه عمل می‌کند و با افزایش سطح تماس ورق با سنبه و عملکرد مثبت نگه‌دارنده‌ی اصطکاکی از نازک‌شدگی بیش از حد ورق در ناحیه‌ی بدون تکیه‌گاه و به‌ویژه در پیشانی قطعه‌کار جلوگیری می‌کند. البته با افزایش بیش از حد فشار سیال این روند معکوس می‌شود و ضخامت قطعه‌کار بیش‌تر کاسته خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که اصطکاک نیز تأثیر بالایی در بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B دارد و با استفاده از سنبه‌ی خشن‌تر شرایط شکل‌دهی مطلوب‌تر می‌شود. هم‌چنین فاصله‌ی لبه‌ی محیطی قالب با ورق‌گیر (g) کم‌تر، به علت اعمال فشار شعاعی بالاتر و شعاع ورودی قالب بزرگ‌تر منجر به کاهش ضخامت کم‌تری در ناحیه‌ی بحرانی B خواهد شد.





شکل ۱۰ تأثیر اصلی فاکتورها بر بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی B (الف- قطعه‌کار از جنس مس خالص، ب- قطعه‌کار از جنس فولاد St14)



شکل ۱۱ افزایش سطح تماس ورق با سنبه در اثر اعمال فشار سیال بر سطح زیرین ورق

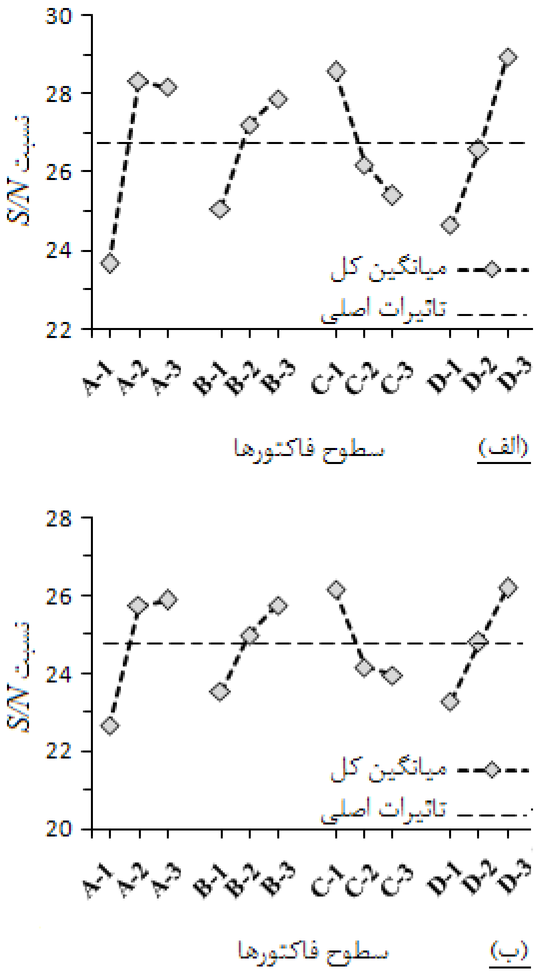
میانگین نسبت S/N بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D برای سطوح مختلف فاکتورها در جدول‌های (۱۳ و ۱۲) به ترتیب برای قطعه‌کار مسی و فولادی نشان داده شده است. هم‌چنین جدول‌های (۱۵ و ۱٤) نتایج آنالیز واریانس را برای بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که مشابه با نتیجه‌ی به‌دست آمده برای ناحیه‌ی بحرانی B، فشار سیال تأثیرگذارترین پارامتر بر بیش‌ترین نسبت کاهش ضخامت در ناحیه‌ی بحرانی D می‌باشد.

جدول ۱۲ میانگین نسبت S/N بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D (مس خالص)

پارامتر	میانگین نسبت S/N		
	سطح 1 (L-1)	سطح 2 (L-2)	سطح 3 (L-3)
F_1	23.6696	28.3317	28.1697
F_2	25.0677	27.2151	27.8882
F_3	28.5661	26.2093	25.3957
F_4	24.6462	26.5740	28.9509

جدول ۱۳ میانگین نسبت S/N بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D (فولاد St14)

پارامتر	میانگین نسبت S/N		
	سطح 1 (L-1)	سطح 2 (L-2)	سطح 3 (L-3)
F_1	22.6520	25.7458	25.8878
F_2	23.5282	24.9867	25.7706
F_3	26.1597	24.1584	23.9674
F_4	26.2003	24.7993	26.2003



شکل ۱۲ تأثیر اصلی فاکتورها بر بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D (الف– قطعه‌کار از جنس مس خالص، ب– قطعه‌کار از جنس فولاد St14)

جدول ۱٤ نتایج آنالیز ANOVA برای بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D (مس خالص)

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت
F_1	2	42.0122	42.3526
F_2	2	13.0195	13.1250
F_3	2	16.2684	16.4003
F_4	2	27.8960	28.1220
کل:	8	99.1963	100
خطا:	0	0.0000	

جدول ۱۵ نتایج آنالیز ANOVA برای بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D (فولاد St14)

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت
F_1	2	20.0620	40.5896
F_2	2	7.7700	15.7204
F_3	2	8.8480	17.9014
F_4	2	12.7463	25.7874
کل:	8	49.4264	100
خطا:	0	0.0000	

شعاع ورودی قالب نیز تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش ضخامت در ناحیه‌ی بحرانی D دارد که نتیجه‌ی فوق مشابه نتیجه‌ی به‌دست آمده در روش کشش عمیق معمولی می‌باشد [19]. فاصله‌ی لبه‌ی محیطی قالب با ورق‌گیر (g) و ضریب اصطکاک بین سطح تماس سنبه با ورق، پارامترهای بعدی تأثیرگذار در بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D می‌باشند. شکل (۱۲) تأثیر اصلی هر یک از فاکتورها را بر بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی D نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل فوق مشخص است استفاده از فشار سیال با سطح L-2 برای قطعه‌ی مسی و سطح L-3 برای قطعه‌ی فولاد St14 منجر به نسبت S/N بالاتر و درنتیجه نازک‌شدگی کم‌تر در قطعه‌ی شکل‌داده‌شده خواهد شد. اندک تفاوت موجود در نتیجه‌ی به‌دست آمده برای دو جنس مورد استفاده را می‌توان به تفاوت موجود در پنجره‌ی شکل‌دهی و رفتار شکل‌پذیری آن‌ها نسبت داد. هم‌چنین مطابق شکل فوق برای هر دو جنس مورد بررسی، در استفاده از سنبه‌ی خشن‌تر، فاصله گپ کوچک‌تر (فشار شعاعی بالاتر) و شعاع ورودی بزرگ‌تر کاهش ضخامت کم‌تری در ناحیه‌ی بحرانی D رخ خواهد داد.

بیش‌ترین عمق کشش. همان‌طور که در بخش‌های قبلی ذکر گردید، در این مقاله تأثیر پارامترهای فرآیندی بر بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، آزمایش‌ها طراحی شده توسط آرایه‌ی متعامد تاگوچی L-9 این بار برای بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی قطعات استوانه‌ای- نیم‌کروی اجرا گردیده‌اند. جدول (١٦) بیش‌ترین عمق کشش قطعات شکل‌داده‌شده و نسبت S/N متناظر با نتیجه‌ی به‌دست آمده را برای ورق‌های مسی و فولادی در ۹ شرایط آزمایشی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این که در شکل‌دهی قطعات ورقی، دست‌یابی به عمق کشش بالاتر مطلوب‌تر می‌باشد، در اجرای آنالیز واریانس بر نتایج نشان داده شده در جدول (١٦) از مشخصه‌ی ارزیابی بزرگ‌تر- به‌تر استفاده شده است.

میانگین نسبت S/N بیش‌ترین عمق کشش برای سطوح مختلف هر یک از فاکتورها در جدول‌های (۱۸ و ۱۷) آمده است. هم‌چنین نتایج آنالیز واریانس در جدول‌ها (۲۰ و ۱۹) نشان داده شده است که مشابه نتایج قبلی به‌دست آمده برای بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در نواحی بحرانی، فشار سیال مؤثرترین عامل در میزان بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی برای هر دو جنس می‌باشد. علاوه بر فشار سیال، شعاع ورودی قالب نیز تأثیر بسزایی در حداکثر عمق کشش قابل دست‌یابی دارد. هم‌چنین ضریب اصطکاک سطح تماس سنبه با ورق و فاصله‌ی بین لبه‌ی محیطی قالب

با ورق‌گیر، پارامترهای بعدی مؤثر در بیش‌ترین عمق قابل کشش قطعه‌کار می‌باشند. تأثیر اصلی فاکتورها بر بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی در شکل (۱۳) به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. مطابق شکل با استفاده از فشار سیال بالاتر، سنبه‌ی خشن‌تر، فاصله گپ کوچک‌تر (فشار شعاعی بالاتر) و شعاع ورودی بزرگ‌تر می‌توان قطعات با عمق کشش بالاتری را شکل‌دهی کرد.

جدول ۱۶ بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی و نسبت S/N متناظر.

شماره آزمایش	مس خالص		فولاد St14	
	نسبت S/N	M. Draw Depth (mm)	نسبت S/N	M. Draw Depth (mm)
1	36.2853	65.2031	33.9799	50.0031
2	36.5609	67.3048	34.4846	52.9948
3	36.9650	70.5116	35.3596	58.6116
4	37.1965	72.4148	35.1955	57.5148
5	36.5613	67.3077	34.4374	52.7077
6	37.5710	76.6049	36.1378	64.1049
7	37.0621	71.3033	34.9952	56.2033
8	38.2073	81.3521	36.8711	69.7521
9	37.3616	73.8044	35.8310	61.8804

جدول ۱۷ میانگین نسبت S/N بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی (مس خالص)

پارامتر	میانگین نسبت S/N		
	سطح 1 (L-1)	سطح 2 (L-2)	سطح 3 (L-3)
F_1	36.6038	37.1096	37.5437
F_2	36.8480	37.1098	37.2992
F_3	37.3545	37.0397	36.8629
F_4	36.7361	37.0647	37.4563

جدول ۱۸ میانگین نسبت S/N بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی (فولاد St14).

پارامتر	میانگین نسبت S/N		
	سطح 1 (L-1)	سطح 2 (L-2)	سطح 3 (L-3)
F_1	34.6080	35.2569	35.8991
F_2	34.7235	35.2644	35.7761
F_3	35.6629	35.1704	34.9308
F_4	34.7495	35.2059	35.8088

جدول ۱۹ نتایج آنالیز ANOVA برای بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی (مس خالص).

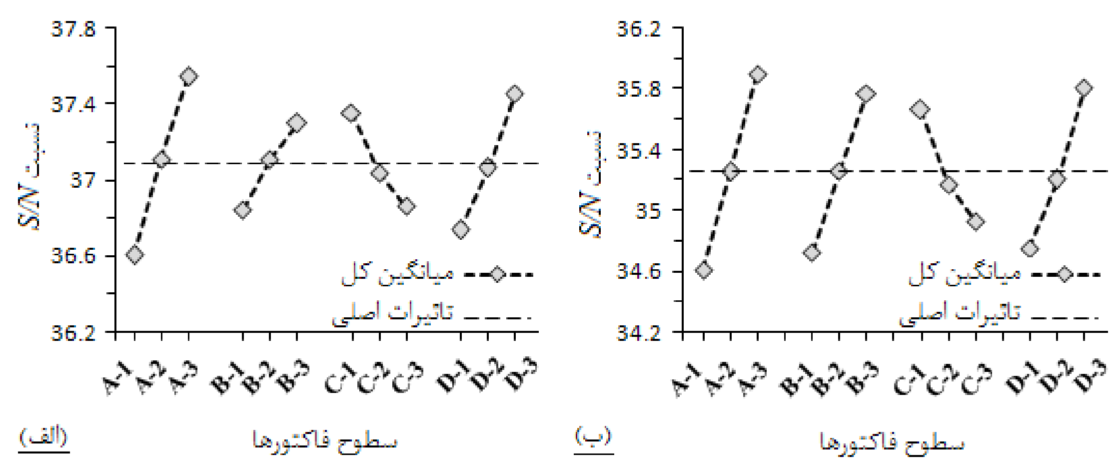
پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت
F_1	2	1.3277	47.6202
F_2	2	0.3080	11.0491
F_3	2	0.3721	13.3479
F_4	2	0.7801	27.9826
کل:	8	2.7881	100
خطا:	0	0.0000	

جدول ۲۰ نتایج آنالیز ANOVA برای بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی (فولاد St14).

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	درصد مشارکت
F_1	2	2.5002	37.3584
F_2	2	1.6623	24.8387
F_3	2	0.8360	12.4929
F_4	2	1.6939	25.3102
کل:	8	6.6926	100
خطا:	0	0.0000	

جدول (۲۱) میزان تأثیر و سطح مطلوب هریک از فاکتورها را برای سه تابع هدف انتخاب‌شده برای قطعه مسی مورد مقایسه قرار داده است. از نتایج به‌دست آمده می‌توان مشاهده کرد که برای هر سه تابع هدف انتخاب‌شده، یعنی بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در نواحی بحرانی B و D و هم‌چنین بیش‌ترین عمق قابل کشش قطعه‌کار، فشار سیال بیش‌ترین تأثیر را بر نتیجه‌ی نهایی دارد. این امر، حاکی از درجه‌ی اهمیت بالای این فاکتور است و نشان می‌دهد که برای شکل‌دهی قطعات با عمق کشش بالا، کیفیت مناسب و توزیع ضخامت یک‌نواخت با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ انتخاب مسیر فشار مناسب امری لازم و ضروری می‌باشد. مقایسه‌ی سطح مطلوب انتخاب‌شده برای فشار سیال در سه تابع هدف انتخاب‌شده نشان

می‌دهد که برای یک عمق کشش ثابت، استفاده از فشار سیال با سطح L-2 مناسب است و منجر به کاهش ضخامت کم‌تری در نواحی بحرانی B و D می‌گردد؛ در حالی که برای دست‌یابی به عمق کشش بالاتر استفاده از فشار سیال با سطح L-3 مناسب‌تر می‌باشد. این موضوع، نشان‌دهنده‌ی این حقیقت است که در فرآیند هیدروفرمینگ ورق برای شکل‌دهی قطعات با عمق کشش بالاتر فشار بالاتر سیال مورد نیاز است. با مقایسه‌ی نتایج قبلی ارائه‌شده همین روند برای قطعه‌کار فولادی نیز قابل مشاهده است. سایر پارامترهای موردمطالعه اگرچه برای توابع هدف مختلف میزان تأثیرات متفاوتی نشان می‌دهند، ولی سطح مطلوب انتخاب‌شده برای تمامی پارامترها در هر سه تابع هدف یکسان می‌باشد به طوری که استفاده از سنبه‌ی خشن‌تر و شعاع ورودی بزرگ‌تر منجر به به‌تر شدن شرایط شکل‌دهی و کاهش ضخامت کم‌تر در نواحی بحرانی خواهد شد و قطعات با عمق کشش بالاتری را می‌توان شکل‌داد. هم‌چنین می‌توان مشاهده کرد که فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی محیطی قالب و ورق گیر g که مستقیماً میزان فشار شعاعی اعمال شده به لبه‌های ورق را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بر بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در نواحی بحرانی و بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی میزان تأثیر تقریباً مشابهی دارد. این امر، حاکی از عملکرد مثبت فشار شعاعی اعمال‌شده در بهبود توزیع ضخامت و افزایش بیش‌ترین عمق کشش قطعات شکل‌داده می‌باشد و نشان می‌دهد که روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی می‌تواند به‌عنوان یک روش بسیار مناسب برای شکل‌دهی قطعات با نسبت کشش بالا و آلیاژهایی با شکل‌پذیری پایین مطرح شود. نکته‌ی قابل توجه دیگر در جدول (۲۱) این است که میزان تأثیر و ترتیب درجه‌ی اهمیت پارامترها بر بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی D و بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی در قطعات شکل‌داده‌شده شباهت بسیار زیادی با هم دارند. علت این تشابه این است که در شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای- نیم‌کروی با عمق کشش بالا در بیش‌تر مواقع، پارگی در ناحیه‌ی انتقال سطح نیم‌کروی به استوانه‌ای یعنی ناحیه‌ی بحرانی D اتفاق می‌افتد. بنابراین، پارامترهای تأثیر گذار در بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در ناحیه‌ی بحرانی D، مستقیماً بیش‌ترین عمق قابل کشش قطعات را نیز تحت تأثیر قرار خواهند داد.



شکل ۱۳ تأثیر اصلی فاکتورها بر بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی برای قطعات شکل‌داده‌شده (الف- قطعه‌کار از جنس مس خالص، ب- قطعه‌کار از جنس فولاد St14)

جدول ۲۱ مقایسه‌ی میزان تأثیر و سطح مطلوب هر یک از فاکتورها برای توابع هدف انتخاب‌شده (مس خالص)

فاکتور	ناحیه‌ی بحرانی B		ناحیه‌ی بحرانی D		بیش‌ترین عمق کشش	
	میزان تأثیر(٪)	سطح مطلوب	میزان تأثیر(٪)	سطح مطلوب	میزان تأثیر(٪)	سطح مطلوب
F_1: فشار سیال	46.2093	2	42.3526	2	47.6202	3
F_2: ضریب اصطکاک	36.2047	3	13.1250	3	11.0491	3
F_3: گپ (g)	17.0840	1	16.4003	1	13.3479	1
F_4: شعاع ورودی	0.5028	3	28.1220	3	27.9826	3

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از ترکیب روش اجزای محدود و تکنیک تاگوچی، یک روش اصولی برای مطالعه و تحلیل هم‌زمان تأثیر پارامترهای شکل‌دهی بر کیفیت شکل‌پذیری قطعات در فرآیند هیدروفرمینگ ورق توسعه داده شد. مدل اجزای محدود فرآیند با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.7.1 ایجاد گردید و بعد از اثبات تجربی آن، با استفاده از ترکیب روش اجزای محدود و تکنیک تاگوچی تأثیر پارامترهای کلیدی شکل‌دهی مانند فشار سیال محفظه‌ی شکل‌دهی، ضریب اصطکاک سطح تماس سنبه و ورق، فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی محیطی قالب با سطح ورق‌گیر و شعاع ورودی قالب در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مورد بحث قرار گرفت. برای بررسی تأثیر پارامترهای فوق قطعات استوانه‌ای- نیم‌کروی با استفاده از ورق‌هایی از جنس مس خالص و فولاد St14 شکل داده شد. به‌منظور شناسایی درجه‌ی اهمیت و میزان تأثیر هریک از پارامترها بر کیفیت شکل‌پذیری قطعه‌کار و به‌دست آوردن ترکیب بهینه‌ی پارامترها، آنالیز واریانس (ANOVA) بر نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها اجرا شد. در این مقاله، برای اندازه‌گیری کیفیت شکل‌دهی از دو معیار مجزای بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در یک عمق کشش ثابت و حداکثر عمق کشش قابل دست‌یابی استفاده گردید. به این منظور، آزمایش‌های طراحی شده توسط آرایه‌ی متعامد یک بار برای عمق کشش ثابت و بار دوم برای به‌دست آوردن بیش‌ترین عمق قابل کشش قطعه‌کار اجرا گردیدند. نتایج به دست آمده از آنالیز واریانس به شرح زیر می‌باشد:

۱. برای هر دو مشخصه‌ی کیفی بیش‌ترین نسبت نازک‌شدگی در نواحی بحرانی و بیش‌ترین عمق کشش قابل دست‌یابی فشار سیال بیش‌ترین تأثیر را بر کیفیت شکل‌پذیری قطعه‌کار دارد. این امر، نشان می‌دهد که در فرآیند هیدروفرمینگ ورق برای شکل‌دهی قطعات با توزیع ضخامت یک‌نواخت و عمق کشش بالا، انتخاب مسیر فشار مناسب اهمیت بسیار بالایی دارد.

۲. مقایسه سطح مطلوب انتخاب‌شده برای فشار سیال برای دو مشخصه‌ی کیفی نشان می‌دهد که برای شکل‌دهی قطعات با عمق کشش بالاتر نیاز به فشار سیال بالایی می‌باشد.

۳. استفاده از سنبه‌ی خشن‌تر و شعاع ورودی قالب بزرگ‌تر منجر به به‌تر شدن شرایط شکل‌دهی می‌شود و کاهش ضخامت کم‌تری در قطعه‌کار رخ خواهد داد و می‌توان قطعات با عمق کشش بالاتری را شکل‌دهی کرد.

۴. برای هر دو مشخصه‌ی کیفی، در استفاده از فاصله‌ی بین سطح لبه‌ی محیطی قالب و ورق‌گیر g کم‌تر، به علت اعمال فشار شعاعی بالاتر شرایط شکل‌دهی بهبود می‌یابد که حاکی از عملکرد مثبت فشار شعاعی اعمال‌شده در بهبود توزیع ضخامت و افزایش بیش‌ترین عمق کشش قطعات شکل‌داده می‌باشد. به عبارت دیگر، روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با

فشار شعاعی می‌تواند به‌عنوان روش مناسبی برای شکل‌دهی قطعات با نسبت کشش بالا و از آلیاژهای با شکل‌پذیری کم مطرح گردد.

۵. نتایج به‌دست آمده برای هر دو جنس مورداستفاده تقریباً روند مشابهی داشت. بنابراین، با استفاده از نتایج به‌دست آمده از آنالیز واریانس مطالعات بهینه‌سازی بعدی می‌تواند بر اساس درجه‌ی اهمیت پارامترها صورت گیرد.

مراجع

1. Zhang, S.H., Wang, Z.R., Xu, Y., Wang, Z.T. and Zhou, L.X., "Recent developments in sheet hydroforming technology", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, pp. 237-241, (2004).
2. Soo-Ik, Oh., Jeon, B.H., Kim, H.Y. and Yang, J.B., "Applications of hydroforming processes to automobile parts", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 174, pp. 42-55, (2006).
3. Lang, L.H., Wang, Z.R., Kang, D.C., Yuan, S.J., Zhang, S.H., Danckert, J. and Nielsen, K.B. "Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, pp. 165-177, (2004).
4. Amino, H., Nakamura, K. and Nakagawa, T., "Counter-pressure deep drawing and its application in the forming of automobile parts", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 23, pp. 243-265, (1990).
5. Hsu, T.C. and Hsieh, SJ., "Theoretical and experimental analysis of failure the hemispherical punch hydroforming processes", *journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 118, pp. 434-438, (1996).
6. El-Sebaie, M.G. and Mellor, M.G., "pressure assisted deep drawing", *Ann, CIRP*, Vol. 22(1), pp. 71-72, (1973).
7. Zhang, S.H., Jensen, M.R., Nielsen, K.B., Danckert, J. Lang, L.H. and Kang, D.C., "Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 142, pp. 544-550, (2003).
8. Liu., X., Xu, Y. and Yuan, S., "Effects of loading paths on hydrodynamic deep drawing with independent radial hydraulic pressure of aluminum alloy based on numerical simulation", *Journal of Materials Processing Technology*., Vol. 24, pp. 395-399, (2008).
9. Roy, RK., "*Design of Experiment Using Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*", Wiley Inter science., New York, (2001).
10. Roy, R., "*A Primer on the Taguchi Method*", Van Nostrand Reinhold., New York, (1990).

11. Lang, L., Danckert, J. and Nielsen, K.B., "Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part II. Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, pp. 150-161, (2004).
12. Li, B., Nye, T., Metzger, D.R., "Multi-objective optimization of forming parameters for tube hydroforming process based on the Taguchi method", International Journal of Advance Manufacturing Technology, Vol. 28, pp. 23–30, (2006).
13. Sharma, A.K. and Rout, D.K., "Finite element analysis of sheet hydromechanical forming of circular cup", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 1445-1453, (2009).
14. Lang,L., Danckert, J. and Nielsen, K.B., "Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.148, pp. 119-131, (2004).
15. Gorji, A.H., Alavi-Hashemi, H., Bakhshi-jooybari, M., Nourouzi, S. and Hosseinipour, S.J., "Investigation of hydrodynamic deep drawing for conical–cylindrical cups", *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 56, pp. 915-927, (2011).
16. ABAQUS 6.9-PR11. Documentation, User's manual.
17. Yingyot, A.U.L., Ngaile, G. and Altan, T., "Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification", *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 146, pp. 137-143, (2004).
18. Ross, P.J., "*Taguchi Techniques For Quality Engineering*", McGraw-Hill., Singapore, (1989).
19. Padmanabhan, R., Oliveira, M.C., Alves, J.L. and Menezes, L.F., "Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel", *Finite Element in Analysis and Design*, Vol. 43, pp. 1062-1067, (2007).